

В.А.Мехеда

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ

Эффект Баушингера, образование площадки текучести на кривых растяжения, физический предел усталости и другие свойства металлов объясняются особенностью деформирования поверхностных слоев: эффектом раннего течения поверхностного слоя [2, 4, 5]. Исследование этого эффекта позволяет извлечь весьма важную информацию о способности материала сопротивляться статическому и переменному деформированию.

Среди удобных в практическом применении методов измерения деформаций поверхности выделяется электротензометрический метод. Поскольку наклеенный тензорезистор (датчик) непосредственно контактирует с поверхностными слоями металла, следует ожидать проявления высокой чувствительности его к поверхностным эффектам.

Сначала рассмотрим показания тензорезистора в случае изгиба образца прямоугольного сечения относительно оси x (рис. I).

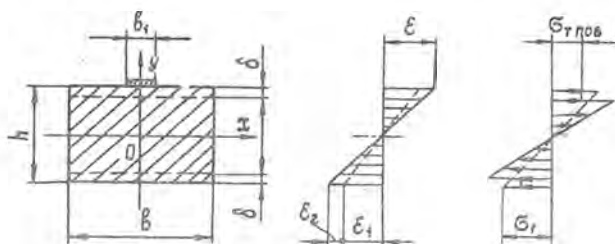


Рис. I

Как и в работе [1], будем приближенно считать образец состоящим из линейно деформируемой сердцевинки и идеально пластического поверхностного слоя толщиной δ . Предположим, что при номинальных напряжениях выше предела текучести поверхностного слоя $\sigma_{T\text{пов}}$ справедлива гипотеза плоских сечений.

Если бы весь объем материала образца подчинялся закону Гука, то внешний изгибающий момент M вызвал бы на поверхности образца деформацию

$$\varepsilon_1 = M / WE, \quad (1)$$

где W — момент сопротивления изгибу, E — нормальный модуль упругости. Для этого случая эпюры напряжений σ и деформаций ε показаны на рис. 1 пунктиром.

При упруго-пластическом деформировании поверхностные слои образца воспринимают часть ΔM внешнего изгибающего момента

$$\Delta M = \sigma_{T\text{пов}} \delta \delta (h - \delta). \quad (2)$$

На долю внутренних упругих слоев приходится момент $M - \Delta M$. Тогда выражение для деформации поверхностного слоя примет вид

$$\varepsilon = \frac{M - \Delta M}{We E} \frac{h/2}{h/2 - \delta}, \quad (3)$$

где $We = \frac{\delta (h - 2\delta)^2}{6}$ — момент сопротивления изгибу упругой части образца. Эпюры σ и ε для упруго-пластического образца обозначены на рис. 1 сплошной линией. Как видно из рис. 1, полную деформацию поверхности образца, фиксируемую тензорезистором, можно разбить относительно внешней нагрузки на линейную ε_1 и нелинейную ε_2 — составляющие:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

Решая совместно уравнения (1), (2), (3) и отбрасывая члены, содержащие δ/h в степени больше первой, получим

$$\delta/h = \frac{\varepsilon_2}{6(\varepsilon - \varepsilon_{T\text{пов}})}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{T\text{пов}} = \sigma_{T\text{пов}} / E$.

Аналогичные выражения для других случаев нагружения образцов имеют вид:

растяжение-сжатие круглых образцов

$$\frac{\delta}{d} = \frac{\varepsilon_2}{4(\varepsilon - \varepsilon_{T\text{пов}})}; \quad (5)$$

растяжение-сжатие плоских образцов

$$\frac{\delta}{h} = \frac{\varepsilon}{2(B+h)} \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon - \varepsilon_{T\text{пов}})} ; \quad (6)$$

кручение круглых образцов

$$\frac{\delta}{d} = \frac{\gamma_2}{8(\gamma - \gamma_{T\text{пов}})} \quad (7)$$

Здесь d - диаметр образца; γ и γ_2 - соответственно полная и нелинейная деформации сдвига.

Чтобы оценить, например по формуле (4), толщину δ ослабленного поверхностного слоя как функцию нагрузки, необходимо снять диаграмму изгиба образца. Для повышения точности измерения величин $\sigma_{T\text{пов}}$ и ε_2 можно использовать специальную схему включения тензорезисторов в измерительный мост [3].

Экспериментальные статические диаграммы изгиба в координатах "номинальное напряжение $\sigma = M/W$ - нелинейная деформация ε_2 " для стали IX18N9T и алюминиевого сплава Д16АТ приведены на рис.2.

Эти материалы испытывались в состоянии поставки. Образцы с рабочей частью в виде балки равного сопротивления изгибу толщиной $h = 4\text{мм}$ закреплялись консольно. Продольная ось образцов совпадала с направлением прокатки исходного листа.

Чувствительность измерительной схемы до $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-6}$ достигалась на базе высокостабильного статического электротензомера ВСТ-3, микромперметра типа М95 с использованием фольговых тензорезисторов типа 2ФКПА-3-100ГВ. Нелинейные деформации ε_2 (см. рис. 1) фиксировались по методике, описанной в работе [3].

Как видно из рис. 2, интенсивные пластические деформации в образце из стали IX18N9T начинаются при напряжении $\sigma_{T\text{пов}} = 10\text{кг/мм}^2$ в образце из сплава Д16АТ - при $\sigma_{T\text{пов}} = 6\text{кг/мм}^2$.

Результаты расчета глубины поверхностного слоя δ , охваченного пластической деформацией, от величины приложенного номинального напряжения σ приведены на рис. 3.

Обладая некоторой жесткостью на растяжение, тензорезисторы искажают исследуемое поле деформаций. Степень такого искажения приближенно оценим по соотношению жесткостей на растяжение наклеенного тензорезистора и тонкого поверхностного слоя толщиной δ

$$\psi = \frac{(EF)_{\delta}}{(EF)_{\delta}} 100\% , \quad (8)$$

где $(EF)_{\delta}$ - жесткость датчика на растяжение, $(EF)_{\delta}$ - жесткость на растяжение ослабленного поверхностного слоя.

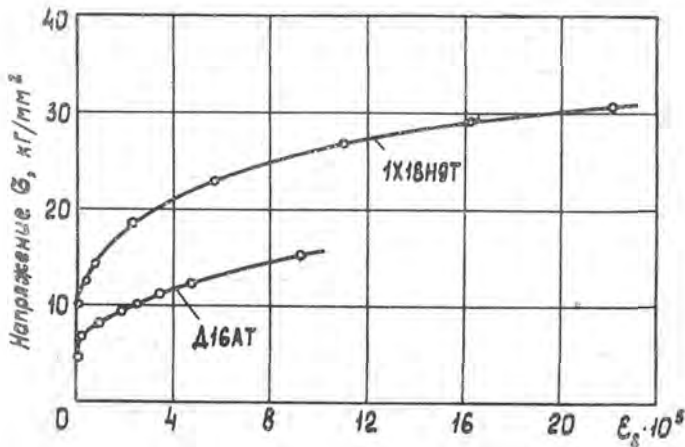


Рис. 2

Коэффициент ψ является функцией напряжения. В таблице I приведены его значения для напряжений, равных пределу выносливости образцов σ_{-1} , на базе $N = 10^6$ циклов. Через δ_{-1} обозначена толщина поверхностного пластического слоя, найденная по формуле (4), если ϵ_2 и ϵ соответствуют $\sigma = \sigma_{-1}$. Автором использовались одинаковые образцы как при проведении усталостных испытаний на изгиб, так и при получении статических диаграмм изгиба.

Таблица I

Материал	$\sigma_{\text{глов}}$, [кг/мм ²]	σ_{-1} , [кг/мм ²]	δ_{-1} , [мкм]	$\psi_{\text{min}} \div \psi_{\text{max}}$	
				$\delta_g = 2 \text{ мкм}$	$\delta_g = 10 \text{ мкм}$
Сталь IX18H9T	10	24	60	0,1 ÷ 0,9	0,6 ÷ 4,0
Сплав Д16АТ	6	10	30	0,9 ÷ 6,0	3,0 ÷ 23,0

При определении площади поперечного сечения тензорешетки датчика взяты два крайних значения толщины фольги серийных тензорезисторов: $\delta_g = 2 \text{ мкм}$ и $\delta_g = 10 \text{ мкм}$ [6].

При расчете эффективной площади поверхностного слоя остается неопределенным вопрос выбора его ширины. Если за ширину слоя взять

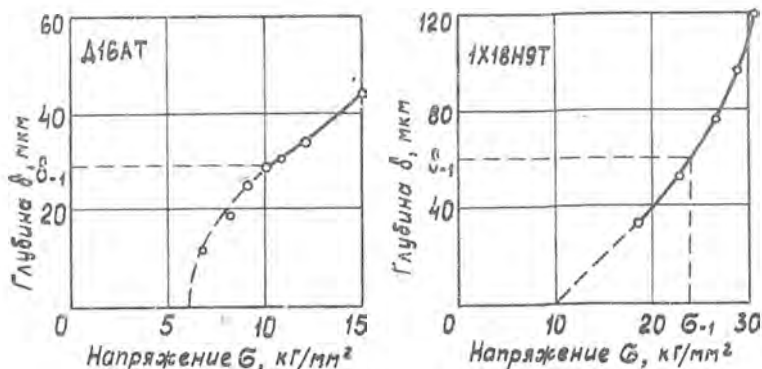


Рис. 3

размер δ_1 , равный ширине тензорешетки (см. рис. 1), то получим завышенное значение коэффициента - ψ_{max} , так как не учитывается влияние близлежащих объемов. Размер δ дает заниженное значение - ψ_{min} . Значения ψ_{min} и ψ_{max} при $\sigma = \sigma_1$, как крайние оценки коэффициента ψ приведены в таблице 1.

С уменьшением напряжения точность измерения нелинейных деформаций падает. Поэтому соответствующие участки кривых на рис. 3 показаны пунктиром.

Л и т е р а т у р а

1. Гурьев А.В., Водопьянов В.И. О влиянии состояния поверхностного слоя образцов на величину экспериментально определяемого предела упругости. "Заводская лаборатория", № 9, 1971.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф., Пойда В.Г. Общность природы предела усталости и физического предела текучести. В кн. "Усталость металлов и сплавов", "Наука", М., 1971.
3. Мехеда В.А., Хазанов Х.С. О методах измерения динамической петли гистерезиса. В сб. "Вопросы прикладной механики в авиационной технике". Труды КуАИ, вып. 63, Куйбышев, 1972.
4. Терентьев В.Ф. К вопросу о природе физического предела текучести и хрупкого разрушения. ДАН СССР, 185, № 1, 1969.
5. Терентьев В.Ф. Модель физического предела усталости металлов и сплавов. ДАН СССР, 185, № 2, 1969.
6. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. Из-во "Высшая школа", Минск, 1975.